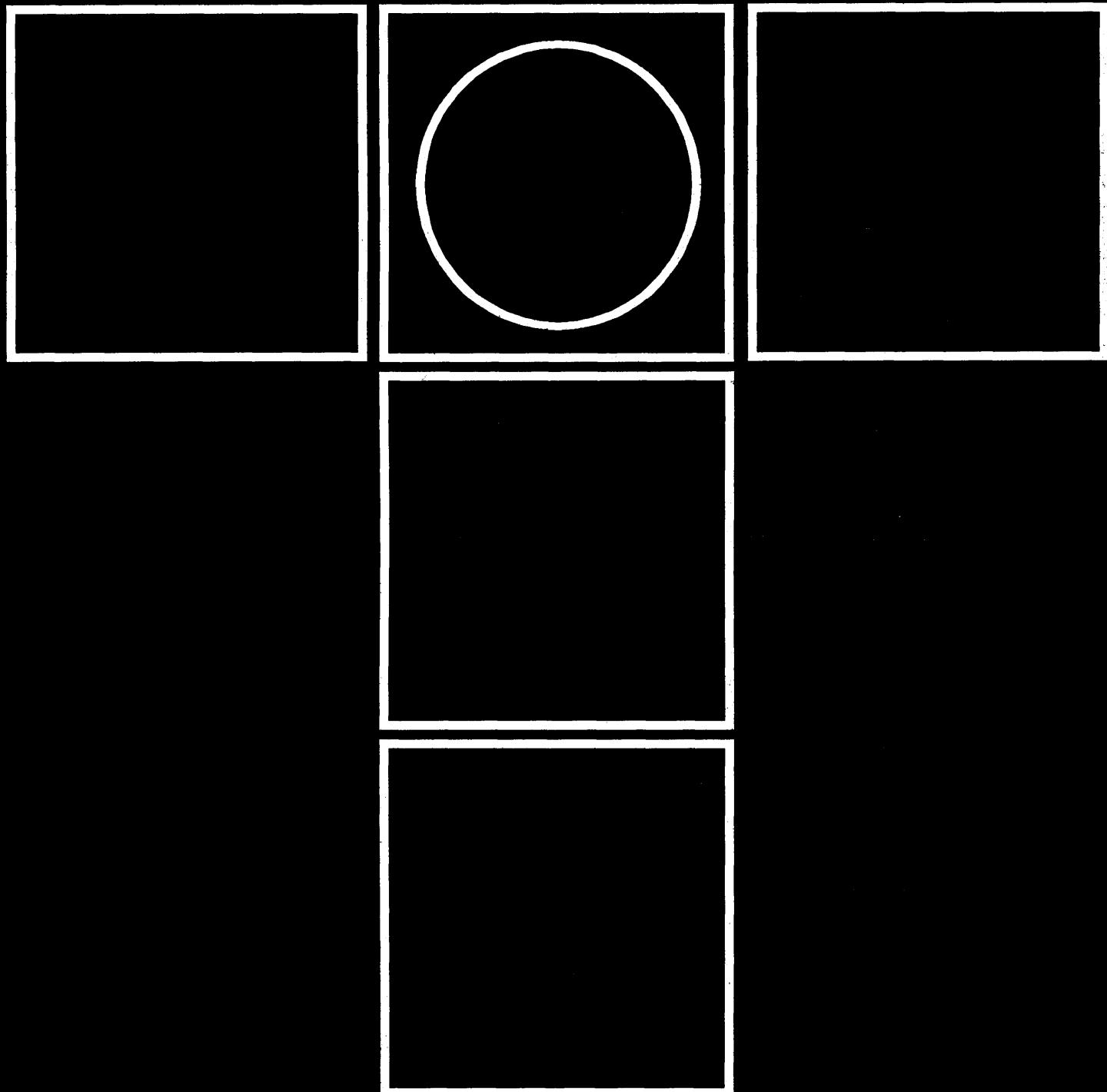


# tribologija u industriji

tribology in industry ◇ трибология в промышленности

YU ISSN 03551 - 1642  
GODINA XIV  
SEPTEMBAR 1992

3



Nauka i tehnologija o prenosu i rasipanju masa i energije u mehaničkim sistemima

# tribologija u industriji

## tribology in industry – трибология в промышленности

sadržaj



contents



содержание

UVODNIK  
INTRODUCTION  
ПЕРЕДОВИЦА
 B. IVKOVIĆ: Tribologija u industriji - plan izdavačke delatnosti  
 u 1993. godini ◊ Tribology in Industry - Plan of Publishing Activities  
 in 1993. ◊ Трибология в промышленности - план выпуска  
 на 1993. год . . . . . 69
ISTRAŽIVANJA  
RESEARCH  
ИССЛЕДОВАНИЯ
 A. RAC: Prediction of Tribological Behaviuor of Surface Treated  
 Materials Using A Pin/Disc Device ◊ Predviđanje triboloških karakteristika  
 tretiranih površina korišćenjem tribometra tipa epruveta/disk  
 ◊ Прогнозирование трибологических характеристик улучшенных  
 поверхностей при использовании трибометра типа  
 образец/диск . . . . . 71

 M. BABIĆ, B. JEREMIĆ: Specifičnosti ispitivanja trenja i habanja  
 na tribometrima ◊ Specificities of Wear And Friction Investigations  
 on Tribometers ◊ Специфика исследований трения и  
 изнашивания на трибометрах . . . . . 77

 D. JOSIFOVIĆ, N. JOVIĆ: Mogućnost modeliranja topografije  
 površina u kontaktu ◊ Possibility for modeling of the topography  
 by contact surfaces ◊ Возможность моделирования топографии  
 контактирующих поверхностей . . . . . 85
ZA NEPOSREDNU PRAKSU  
FOR DIRECT PRACTICE  
ДЛЯ НЕПОСРЕДСТВЕННОУЮ  
ПРАКТИКУ
 B. TADIĆ, Lj. ISAILOVIĆ: TIS - Informacije: Vretenasta glodala  
 sa i bez TiN prevlaka . . . . . 90
NOVOSTI  
NEWS  
ИЗВЕСТИЯ

. . . . . 93

TRIBOLOŠKI REČNIK  
GLOSSARY OF TRIBOLOGY TERMS  
СЛОВАРЬ ПО ТРИБОЛОГИИ

. . . . . 94

KNJIGE I ČASOPISI  
BOOKS AND JOURNALS  
КНИГИ И ЖУРНАЛЫ

. . . . . 96

NAUČNI SKUPOVI  
SCIENTIFIC MEETINGS  
НАУЧНЫЕ СОБРАНИЯ

. . . . . 98

**B. IVKOVIĆ**

# **Tribologija u industriji -plan izdavačke delatnosti u 1993. godini**

Primena triboloških znanja u industrijskim i transportnim sistemima zavisi, u velikoj meri, od obima i kvaliteta informacija tribološkog karaktera koje su prisutne u naučnoj i stručnoj javnosti. Tribološke akcije, koje se u industrijski razvijenim zemljama organizuju povremeno da bi povećali primenu triboloških znanja u praksi, zasnivaju se i na brojnim štampanim publikacijama različitih vrsta i nivoa. Danas je već dovoljno poznato da povećanje produktivnosti, pouzdanosti i rentabilnosti proizvodnih procesa zavisi i od obima korišćenja triboloških znanja sačuvanih u brojnim publikacijama različitih vrsta (knjige, priručnici, časopisi i sl.). Industrijski razvijene zemlje u kojima se ostvaruje visoka produktivnost proizvodnih procesa imaju i razvijenu obimnu izdavačku delatnost u svim oblastima nauke i tehnike pa i u oblasti tribologije.

Izdavačka delatnost u oblasti tribologije u našoj zemlji u protekloj deceniji bila je dosta ograničenog obima. U desetogodišnjem periodu objavljene su samo tri knjige iz ove oblasti i to udžbeničkog karaktera, namenjene studentima mašinskih fakulteta i inženjerima u praksi i jedan obiman priručnik o mazivima i podmaziva-

nju. Jedan deo informacija tribološkog karaktera može se naći i u stručnim knjigama iz drugih oblasti ali su one, po pravilu, neodgovarajućeg nivoa i ne mogu da se koriste za ozbiljniju primenu u praksi.

Časopis TRIBOLOGIJA U INDUSTRIFI izlazio je u proteklom desetogodišnjem periodu redovno četiri puta godišnje, izlažući javnosti kako rezultate triboloških istraživanja domaćih naučnih institucija tako i rezultate istraživanja ostvarenih u drugim zemljama. Pored ovog časopisa rezultati triboloških istraživanja, posebno iz oblasti podmazivanja, objavljivani su i u časopisu GORIVA I MAZIVA.

Nedovoljna publicistička delatnost iz oblasti tribologije u našoj zemlji uticala je i na nivo eksploatacije proizvodne i druge opreme u industriji i transportnih sredstava, na visinu troškova održavanja i produktivnosti procesa u industrijskim i transportnim sistemima i na kvalitet njihovog poslovanja u celini.

U 1993. godini planira se, u okviru časopisa TRIBOLOGIJA U INDUSTRIFI, čiju redakciju danas čini grupa eminentnih naučnih radnika iz oblasti tribologije iz zemlje i inozemstva, pokretanje biblioteke

"TRIBOLOGIJA" koja treba da prezentira domaćoj naučnoj i stručnoj javnosti na srpskom jeziku savremena tribološka znanja do kojih se došlo istraživanjima, ne samo kod nas već i u svetu. U prvoj godini razvoja ove biblioteke (u 1993. godini) planira se izdavanje tri knjige i to:

**1. Grupa autora,  
TRIBOLOŠKI REČNIK**

**2. V. A. Dovgjalo, O. P. Yurkevič,  
KOMPOZICIONI MATERIJALI I  
PREVLAKE**

**3. B. Ivković,  
TRIBOLOGIJA**

TRIBOLOŠKI REČNIK sadrži definicije velikog broja termina koji se koriste u tribologiji i drugim oblastima tehnike, a odnose se na tribološke procese i pojave u tribomehaničkim sistemima svih vrsta. Ova knjiga treba da ukloni brojne nesporazume koji su prisutni u domaćoj naučnoj i stručnoj javnosti zbog različitog korišćenja mnogih termina i nedefinisanoći nekih pojmove. TRIBOLOŠKI REČNIK treba da olakša korišćenje literature iz oblasti tribologije i omogući kvalitetnije izlaganje sopstvenih rezultata istraživanja. Pored definicija triboloških termina, rečnik sadrži i njihove nazive na engleskom i ruskom jeziku.

**KOMPOZICIIONI MATERIJALI I PREVLAKE** je knjiga koju je ove 1992. godine izdala izdavačka kuća "Nauka i tehnika" iz Minska, Belorusija i koja sadrži savremene informacije o kompozicionim materijalima i prevlakama. Informacija o kompozicionim materijalima i prevlakama, fizičko hemijskim osnovama na kojima su zasnovani, tehnologijama njihovog dobijanja i primene, kao i o njihovim tribološkim karakteristikama, na srpskom jeziku ima vema malo podataka. Kako primena ovih novih materijala i prevlaka neprekidno raste u svetu, to je neophodno da i domaća naučna i stručna javnost dobije mo-

gućnost da na srpskom jeziku upozna ovu problematiku.

Treća knjiga iz ove serije **TRIBOLOGIJA** predstavlja drugo, u velikoj mjeri izmenjeno, izdanje prve knjige štampane 1983. godine na srpskom jeziku pod naslovom "Osnovi tribologije". Knjiga sadrži savremena saznanja o prirodi kontaktnih površina, o teorijama trenja i habanja, o osnovnoj problematiki podmazivanja i drugim oblastima tribologije. Podaci koji se u ovoj knjizi nalaze omogućavaju i dovoljno realan proračun sile trenja odnosno energije koja se troši na savladivanje trenja u tribomehaničkim

sistemima svih vrsta. Sistemski pristup tribološkoj problematici koji je korišćen u ovoj knjizi treba da dopriene i promeni načina razmišljanja o ekonomičnoj eksploataciji proizvodne i druge opreme u industrijskim sistemima.

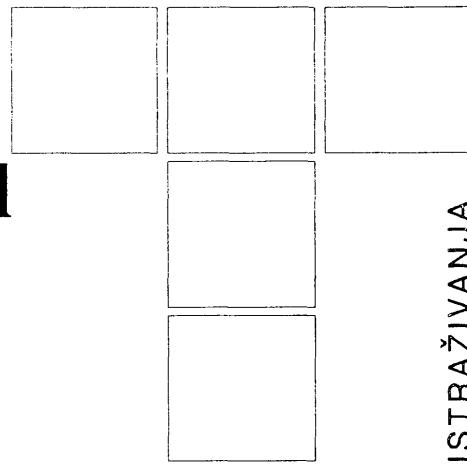
Pored ove tri knjige čije je izdavanje predviđeno u 1993. godini, redakcija časopisa **TRIBOLOGIJA U INDUSTRII** razmotriće mogućnost izdavanja i drugih dela koja mogu biti svrstana u ovu biblioteku i za koje bude iskazan interes od strane stručne javnosti.

## **TRIBOLOGY IN INDUSTRY** - Plan of Publishing Activities in 1993.

*Lack of sufficient information of tribological character in Serbian prevents the greater application of contemporary tribological knowledges in domestic industrial and transportation systems. Editing board of journal TRIBOLOGY IN INDUSTRY decided to start in 1993. a library TRIBOLOGY. It is intended to make available, at highly qualitative way, to domestic scientific and expert public, contemporary knowledges in the area of tribology, and also possibilities of their application in practice. The first three books from this library are TRIBOLOGICAL DICTIONARY by the group of authors, translation of a book COMPOSITE MATERIALS AND COATINGS by V. A. Dovgalo and O. R. Žurkevič, and TRIBOLOGY by B. Ivković.*

## **Трибология в промышленности** - план выпуска на 1993. год

*Нехватка трибологических информаций на сербском языке затрудняет более широкое использование современных трибологических знаний в отечественных промышленных и транспортных системах. Редколлегия журнала Трибология в промышленности формирует в 1993. году библиотеку Трибология, через которую на высококачественном уровне, отечественных и заграничных специалистов будет знакомить с современными трибологическими знаниями и возможностью их применения в практике. Первые три книги из этой библиотеки - ТРИБОЛОГИЧЕСКИЙ СЛОВАРЬ группы авторов, перевод книги В. А. Довгяло и О. Р. Юркевича КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ и ТРИБОЛОГИЯ, Б. Ивковича.*



# Prediction of Tribological Behavior of Surface Treated Materials Using A Pin/Disc Device\*

## 1. INTRODUCTION

The advance in the investigation of materials for tribological purposes is one of the most important paths for decreasing friction and wear and for increasing the efficiency and reliability of mechanical system [1, 2]. This progress is particularly noticeable in the field of surface technology, i.e. in the application of various types of coating and surface modification techniques.

Numerous authors suggest that the development of the surface technology is going to be one of the most important in the wear control [3].

Various types of coatings have, for a long time, been used exclusively for components which were wearing too rapidly. Nowadays surface technology has a large application in engineering and is considered at the machine design stage. Therefore it is necessary that designers have at their disposal the guidelines for selection and application of different surface treatments, including information on tribological properties. However, despite numerous investigations published in literature and a significant advance in fundamental knowledge of tribology, clear guidelines do not exist yet. This is understandable since the friction and wear processes are very complex and the above mentioned characteristics are "system properties", and not the features of every particular material. [4, 5].

If follows that the corresponding information on tribological properties and the creation of databases can be realized only through experimental tribometric researches [6].

Most laboratory investigations of coatings and modified surfaces are undertaken by using tribometers. However, the lack of standard methods and the characteristics of surface layer themselves (usually small thickness, high or low hardness) create additional difficulties in investigations. Therefore a particular approach to experimental investigations is required.

The present paper considers the experiences gained in the course of investigations on different types of surface treated materials. The aim is to arrive at a more clear definition of testing condition on which to base a more realistic choice of surface technology from the point of view of tribological properties.

## 2. SURFACE TREATMENTS AND SURFACE TRIBOLOGICAL PROPERTIES

Various methods of surface treatments are in use [7]. In general, wear resistant surfaces can be realized by adding some material on the substratum or by modifying the surface of the basic material. The aim is to achieve the necessary surface properties since the wear mechanism and the wear rate depend to a large extent on the properties of the surface layer.

Surface coatings and surface modification techniques are numerous, the chosen materials being very different. The investigations published in papers provide a series of information, from general data [8, 9, 10] to detailed surveys of materials which can be used for surfacing [11-15], as well as of procedures for surface treatments [16-28]. However, the lack of tribological data is felt in practice. Many difficulties ensue from the fact that in the papers dealing with tribological characteristics investigators use various research techniques, various wear measuring methods and various ways of presenting the results, which, despite very significant and extensive investigations do not allow a comparison of tribological properties [29-35].

Therefore it becomes imperative to define the methods of investigation which will give, in this important but also very complex field, a more clear image of the possibilities of using the most suitable surface coating or treatment. The problems arising then are the selection of the device and the procedure for research.

Prof. dr Aleksandar Rac, dipl.ing.  
Mašinski fakultet, Beograd

\* Presented at the 4th Symposium INTERTRIBO'90, in Visoke Tatry, ČFSR, April 17-20, 1990

### 3. STRATEGY OF TESTING

The wear resistance of coated and modified surfaces is considerably more complex to investigate in comparison with bulk materials. The difficulties in testing stem from the surface layer properties themselves [36]. For example, wear resistant coatings in general wear slowly, so that the measurements of the loss of the volume of material are in majority of cases unsuitable for the evaluation of wear rate. Further, the coatings are of small thickness, from several microns to several tens of microns, except the welded coatings which may be of several millimeter thickness, which also affects the testing technique. Since the tribological properties depend on both the hardness and the microgeometry, it is necessary to keep in mind, that the difference in hardness of pairing materials is frequently very pronounced and that the various coatings and their technologies give surfaces with different roughness. Those are the reasons requiring special attention to be paid to the selection of devices and the presentation of the results.

#### 3.1 Testing device

Nowadays various testing devices are implemented, among them a series of standard ones (Four-ball, Almen-Wieland, LFW-1, Falex and others). One of the possible configurations of laboratory devices, which probably most successfully meets the requirements for investigation of surface treated materials is a pin/disc machine. Through the analysis of papers published in literature we see that the pin/disc machine is often present in investigations [29, 31, 35, 36, 37]. Then various solution of

devices and the contact conditions of the test specimens are used (Fig.1).

The pin/disc type devices are suitable for investigation due to many reasons [38]:

- the test specimens material selection is possible according to the needs and requirements;
- the test specimens are, in general, of simple geometry;
- various, low and high stress conditions can be realized;
- a large range of load, speed and temperatures can be achieved;
- investigations are possible in dry friction conditions and in the presence of lubricant;
- a good correlation with the practice can be accomplished provided simulation conditions are fulfilled, especially in adhesive type of wear and
- reproducibility of results is good.

The application of the pin/disc machine in the investigation requires good knowledge of such device in order to interpret the result well. The greatest difficulty with the pin/disc tribometer, according to Ludema [39] is that the access to data and their understanding are difficult to designers who lack the basic tribological knowledge but have to design machine or their parts which should satisfy the expected wear life. Owing to the exhibited advantages and due to the specificities pointed to in investigations of coated and modified surfaces, the pin/disc type tribometer seems the most convenient, so that the standardization of such a device and of a corresponding procedure would certainly contribute significantly to easier prediction of tribological characteristics [40].

#### 3.2 Procedure and the presentation of results

All laboratory investigations carried out in tribology, and therefore in the field of surface technology can be subdivided into two basic groups:

One involves the consideration of the effect of properties of various types of coating and/or surface modification on the tribology properties. Usually then the investigation were made for different ranges of speed and loads, with and without the presence of lubricant. Such research must ensure a good repeatability of absolute values of friction and wear. The general recommendation is to repeat test several times (at least three times) in order to get an insight into the variance in the results. The choice of the test duration appears as a significant element, since the variance in the running-in period is the most pronounced, as displayed by the results in the figure 2 and 3 [41]. Therefore the region of steady-state conditions must be reached.

On the basis of the mentioned test results it is possible to realize the reliable data and codes of practice for various coatings and different surface modification technology. Unfortunately investigations are time-consuming and ex-

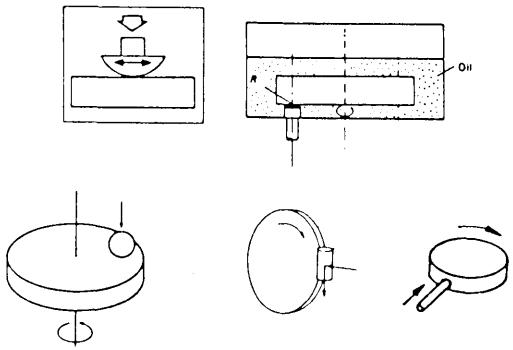
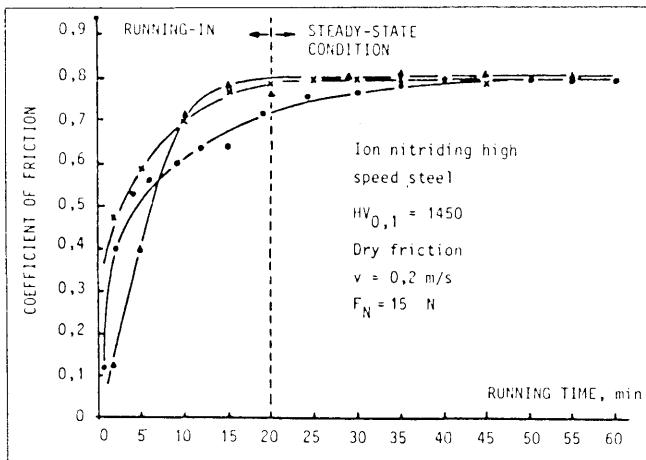


Fig. 1. Some possible pin/disc configurations  
Neke od mogućih konfiguracija optinih tela kod tribometra epruveta/disk  
Некоторы из возможных конфигураций образцов у трибометра образец/диск

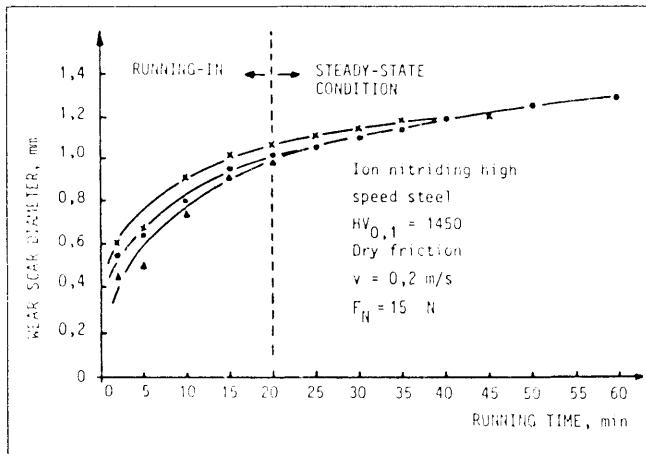


*Fig. 2. Repeatability of the values of friction  
Ponovljivost rezultata pri ispitivanju trenja  
Повторяемость результатов при  
исследовании трения*

pensive. This is probably the reason for a small number of such papers and data. One of the few exceptions is the recently published paper by Habig [42] displaying a comparative survey of results for surface coatings of steels.

The second group consists of testing intended for the determination of the most suitable coating or surface modification techniques for the prescribed purposes. Such tests require the simulation of working condition expected in practice. They can be defined by using the system approach given by Czichos [43], where a similarity in tribological properties of the real and test system is stressed as the most important. It can be realized provided that:

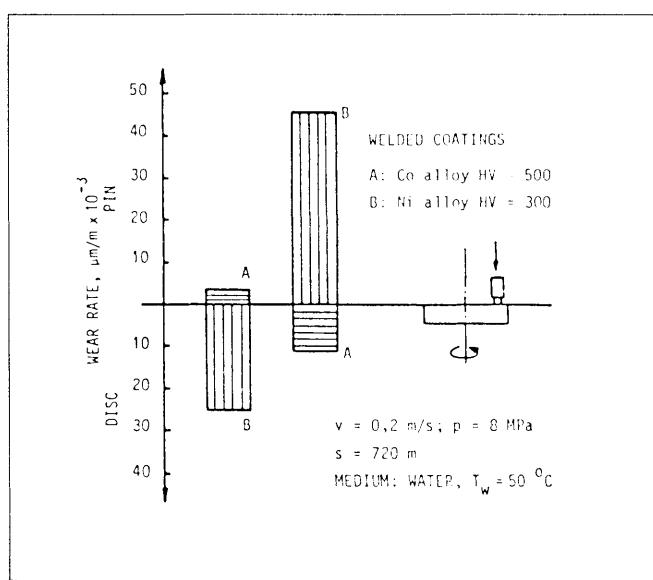
- contact condition and type of motion are the same in the test and real system;



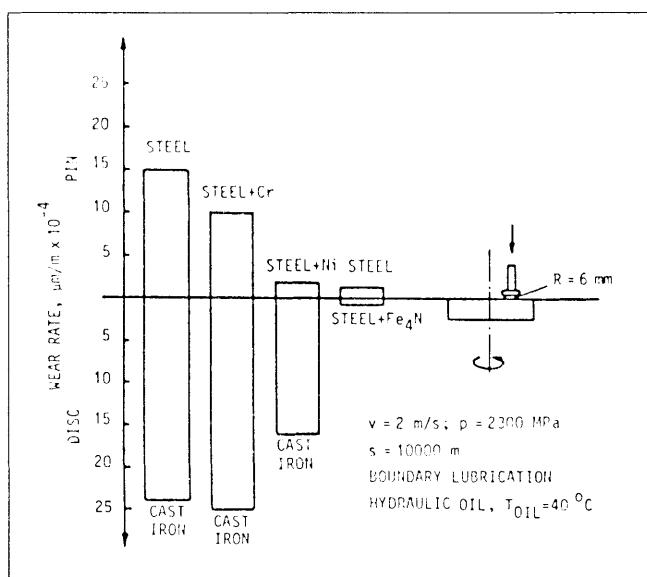
*Fig. 3. Repeatability of the values of wear  
Ponovljivost rezultata merenja habanja  
Повторяемость результатов при  
измерении износа*

- the selected materials for test specimens are in accordance with the real ones;
- the simulation criteria are fixed and
- operating variables are adjusted so as to provide the same or similar tribological properties for both systems.

Apart from mentioned, the wear behavior of treated surface when using the pin/disc device is affected by choice of the pin and the disc materials. The working surface of the pin is in permanent contact and wear, while the wear track on the disc is only partially in contact. Therefore the pin can be designated as "loaded" and the disc as "unloaded" parts. As illustrated by the results shown in figure 4, the same materials alternatively used for the pin and disc yield various wear values [44].



*Fig. 4. The effect of the selection of the pin  
and disc materials on wear  
Uticaj izbora materijala za epruvetu i disk  
na veličinu habanja  
Воздействие выбора материала образца и  
диска на интенсивность изнашивания*



*Fig. 5. Example of the presentation of results  
for a pair of materials [45]  
Primer predstavljanja rezultata  
za par spregnutih materijala  
Пример изображения результатов для  
пары сопряженных материалов*

Comparison of the results reveals that material B shows a greater wear rate with respect to material A, irrespective of whether the part is loaded or unloaded. However, if the results are considered in absolute values, the wear rate depends to a considerable extent on the choice of materials of the pin and the disc.

When investigating thin coatings and modified surfaces the wear rate is most frequently characterized by means of surface profilometry, having in view the difficulties in direct measuring the mass losses or linear wear, which is usual with other materials.

The presentation and interpretation of the results is also an essential element. In the majority of the quoted papers only the results of the treated surface wear are given. Since wear is a property of the system under consideration, and not of a particular material, it is necessary to present the results for a pair of contacting materials (Fig.5.)

Results given in such a way enable the choice of the best combination of materials, which is of particular importance in testing high hardness coatings.

For the identification of wear mechanism it is useful, as in other materials, to use the scanning microscopy and wear debris analysis.

#### 4. CONCLUSIONS

- ▶ Incomplete information on tribological properties of coated and modified surfaces despite a large number of research works and the published results does not make it an easy task for designers to select the most adequate type of surface treatments.
- ▶ Laboratory investigations of tribological properties of such surfaces require particular consideration and re-evaluation of the testing procedure.
- ▶ The aim of these investigations is to get reliable data and to form the database.
- ▶ Probably the most adequate configuration of tribometers for the coated and modified surface testing is the pin/disc: the procedure standardization would be indispensable so that the results of various investigations could be compared. A standard method for presentation of the results should be included.

#### REFERENCES

- [ 1] CHICHOS H., **Current aspects of tribology**, Wear, 77, 1982, 1-11
- [ 2] PETERSON B. M., **Advancements in tribological materials**, Tribology, Fifty Years On, Proc. IME, London, 1987.
- [ 3] SMART F. R., MOORE C. J., **Materials selection for wear resistance**, Wear, 56, 1979, 55-67
- [ 4] KLOOS H. K., **Material selection and material pairing - Tribological consideration**, Wear, 34, 1975, 95-107
- [ 5] SCOTT D., ed., **Treatise on materials science and technology**, vol. 13 Academic Press, 1979
- [ 6] RAC A., **Tribometry**, Symposium YUTRIB'89, Kragujevac, YU, 1989 (In Serbian)
- [ 7] JAMES H. D., SMART F. R., REYNOLDS A. J., **Surface treatments in engine component technology**, Wear, 34, 3, 1975, 373-382
- [ 8] DONOVAN M., SANDERS L. J., **Surface coatings**, I-Introduction, Trib. Int, 5, 5, 1972
- [ 9] SMART F. R., **Selection of surfacing treatments**, Trib. Int., 11, 2, 1987
- [10] RUBINSTEIN M., **Selective plating for manufacturing and maintenance**, Trib. Int., 13, 6, 1980
- [11] GREGORY N. E., **Hardfacing**, Trib. Int., 11, 2, 1978
- [12] SENIOR S. G., **Plymeric coating**, Trib. int., 11, 2, 1978
- [13] ASANABE S. **Applications of ceramics for tribological components**, Trib. Int., 20, 6, 1987
- [14] KRALJ S., IVUŠIĆ V., **Protection against wear by surfacing**, YUTRIB'89, Kragujevac, YU, 1989
- [15] BRENNER E., NICOLL A., **Plasma sprayed tungsten-carbide cobalt wear coating**, Intertribo'87, Vysoke Tatry, ČSSR, 1987
- [16] HAZZARD R., **Surface coatings-Arc welded coatings**, Trib. Int. 5, 5, 1972
- [17] BELL R. G., **Surface coatings-Gas welded coatings**, Trib. Int. 5, 5, 1972
- [18] MANSFORD E. R., **Surface coatings-Spayed coatings**, Trib. Int., 5, 5, 1972
- [19] GREGORY C. J., **Chemical conversion coatings of metals to resist scuffing and wear**, Trib Int., 11, 2, 1978
- [20] INWOOD C. B., GARWOOD E. A., **Electroplated coating for wear resistance**, Trib. Int., 11, 2, 1978
- [21] ELLIOTT L. T., **Surface hardening**, Trib. Int., 11, 2, 1978
- [22] ARCHER J. N., **Vapor deposition of wear resistance surfaces**, Trib. Int., 11, 2, 1978
- [23] DES FORGES D. C., **Laser heat treatment**, Trib. Int., 11, 2, 1978
- [24] CASHON P. E., **Wear resistant coatings applied by detonation gun**, Trib. Int., 8, 3, 1975
- [25] SALTZMAN A. G., AUFDERHAAR B. W., **New antiwear applied by plasma-transferred arc wear surfacing**, Lub. eng., 41, 4, 1985
- [26] HINTERMANN E. H., **Chemical vapour deposition applied in tribology**, Wear, 47, 1987, 407-415
- [27] STEVENS T. K., DOUGLAS A., **Physical vapour deposition coatings-their properties and potential applications**, Tribology, Fifty Years On, Proc. IME, London, 1987
- [28] STRAEDE A. C., **Practical applications of ion implantation for tribological modification of surfaces**, Wear, 130, 1989, 113-122
- [29] MIYOSHI K., SPALVINS T., BUCKEY D., **Tribological characteristics of gold films deposited on metals by ion plating and vapour deposition**, Wear, 108, 1986, 169-184

- [30] TERARUCHI Y., NADANO H., KOHNO M., NAKAMOTO Y., Scoring resistance of TiC and TiN-coated gears, *Trib. Int.*, 20, 5, 1987
- [31] FERDINANDY M., SUCHANEK J., KRAL J., LIŠKA D., Tribologicke vlastnosti PVD povlakov TiN vo vzťahu k ich pripave, *Intertribo'87*, Vysoké Tatry, ČSSR, 1987
- [32] BLAŠKOVIĆ P., LESNAK Š., Tribologicke charakteristiky navarených a nastrídkaných kľukových hriadeľov, *Intertribo'87*, Vysoké Tatry, ČSSR, 1987
- [33] HINTERMANN, Exploitation of wear and corrosion resistant CVD coatings, *Trib. Int.*, 13, 6, 1980
- [34] HARTLEY W. E. N., Ion implantation and surface modification in tribology, *Wear*, 34, 1975, 427-438
- [35] YUST S. C., MCHARGUE J. C., WHITE L. C., ANGELINI P., LEWIS B. M., Wear of ion implanted TiB<sub>2</sub> surfaces, *Eurotrib 85*, Lyon, 1985
- [36] SUNDQUIST H., MATTHEWS A., VALLI J., Tribological coatings deposited by ion plating, *Eurotrib'85*, Lyon, France, 1985
- [37] WALLEN P., HOGMARK S., Influence of TiN coating on wear of high speed steel at elevated temperature, *Wear*, 130, 1989, 123-135
- [38] A. W. J. de GEE, Selection of materials for tribotechnical applications-The role of tribometry, *Trib. Int.*, 11, 4, 1978
- [39] LUDEMA, C. K., Engineering progress and cultural problems in tribology, *Lub. eng.*, 44, 6, 1988
- [40] CZICHOŠ H., Multilaboratory tribotesting: results from the Versailles advanced materials and standards programme on wear test methods, *Wear*, 11, 1987, 109-130
- [41] KAKAŠ D., ZLATANOVIĆ M., RAC A., The investigation of the influence of plasma technology on results at high speed steel wear, 5th Yugoslav symposium on heat treatment of metal, Vr. Banja, YU, 1988 (In Serbian)
- [42] HABIG H. K., Wear behaviour of surface coatings on steels, *Trib. Int.*, 22, 2, 1989
- [43] CZICHOŠ H., A systems analysis data sheet for friction and wear tests and an outline for simulative testing, *Wear*, 41, 1977, 45-55
- [44] RAC A., Investigation of tribological properties of welded coatings, Research report, Faculty of Mech. Eng., Belgrade, 1986 (In Serbian)
- [45] RAC A., Investigation of tribological properties of metal coatings, Research report, Faculty of Mech. Eng., Belgrade, 1986 (In Serbian)

## Predviđanje triboloških karakteristika tretiranih površina korišćenjem tribometra tipa epruveta/disk

*U cilju povećanja otpornosti materijala na habanje danas se koriste mnogobrojni postupci tretiranja površina. Uopšteno, poboljšanje triboloških svojstava materijala može se postići prevlakama ili modifikovanjem karakteristika površinskog sloja osnovnog materijala. Cilj je da se ostvare tražena tribološka svojstva površinskog sloja s obzirom da mehanizam i veličina habanja zavise u velikoj meri od njegovih karakteristika.*

*Međutim, specifičnosti površinskog sloja kod tretiranih materijala zahteva poseban prilaz pri tribološkim istraživanjima, kako sa gledišta procedure ispitivanja, tehnike merenja veličine habanja, tako i predstavljanje rezultata. Ove specifičnosti se ogledaju pre svega u maloj debljinji sloja (od nekoliko mikrometara do nekoliko desetina mikrometara), velikoj ili maloj tvrdoći sloja što ima za posledicu veliku razliku u tvrdoći spregnutih materijala, promeni hraptavosti površina kod nekih tehnologija nanošenja prevlaka itd. Zbog toga je, po mišljenju autora, neophodno da se bliže definišu i ili standardizuju uredaji i procedure ispitivanja triboloških karakteristika prevlaka i modifikovanih površina.*

*U prilog toj ideji u ovom radu se analiziraju iskustva stečena tokom ispitivanja različitih prevlaka i modifikovanih površina, sa osnovnim ciljem da se jasnije definišu uslovi ispitivanja koji treba da obezbede dovoljno realnih informacija vezanih za tribološke karakteristike tretiranih površina i time omoguće izbor odgovarajuće tehnologije. Pri tome se posebno razmatra adekvatnost tribometra tipa epruveta/disk za predmetna istraživanja.*

## Прогнозирование трибологических характеристик улучшенных поверхностей при использовании трибометра типа образец/диск

*Чтобы повысить износостойкость материала в настоящее время используются многие способы улучшения поверхностей. Улучшения трибологических характеристик материала можно добиться нанесением покрытий или модифицированием поверхностного слоя основного материала. Трибологические свойства поверхностного слоя в большей мере определяют механизмы и интенсивность изнашивания.*

Особенности поверхностного слоя улучшенных материалов требуют особого подхода трибологическим исследованиям как в аспекте способа проведения исследований и техники измерения степени износа, так и в аспекте представления получаемых результатов. К этим особенностям относятся прежде всего небольшая толщина слоя (от нескольких микрометров до нескольких десятков микрометров), большая или малая твердость слоя (что обуславливает большие разницы в твердости сопрягаемых материалов), изменение шероховатости при некоторых способах нанесения покрытий и тд. По этому, по мнению авторов, необходимо точно определить и/или стандартизовать оборудование, процесс исследований трибологических характеристик покрытий и модифицированных поверхностей.

В этой работе анализируется опыт приобретенный в ходе испытаний различных покрытий и модифицированных поверхностей, с целью более точного определения условий исследований которые будут давать достаточно реальных информации, связанных с трибологическими характеристиками улучшенных поверхностей, что обеспечит подходящий выбор технологии. При этом особое внимание уделяется адекватности трибометра типа образец/диск, для исследований Этого типа.

## *U 1993. godini očekujte naša izdanja:*

**1. Grupa autora:**

**TRIBOLOŠKI REČNIK**

**2. V. A. Dovgjalo, O. P. Yurkević:**

**KOMPOZICIIONI MATERIJALI  
I PREVLAKE**

**3. B. Ivković:**

**TRIBOLOGIJA**

# Specifičnosti ispitivanja trenja i habanja na tribometrima

ISTRAŽIVANJA

## 1. UVOD

Tribometrijska ispitivanja, strukturno ili funkcionalno usmerena [1], pokrivaju veoma široko polje - od realnih tehničkih sistema pa do modela jednostavne geometrije u standardnim uslovima ostvarivanja kontakta. Nemančkim standardom DIN 50322 svi tipovi ispitivanja dele se na grupu ispitivanja realnih triboloških sistema (ispitivanja na tehničkim sistemima u eksploatacijskim uslovima ili simuliranim eksploatacijskim uslovima i ispitivanja tribosistema na probnom stolu) i grupu ispitivanja modelskih tribomehaničkih sistema (ispitivanja na umanjenim modelima realnih sistema, realnim tribomehaničkim elementima i modelima sa kontaktnim elementima jednostavne geometrije).

Tribometrijska ispitivanja najčešće se obavljaju u laboratorijskim uslovima na uređajima koji se nazivaju tribometrima [1, 2, 3, 4]. Dominacija ovog tipa ispitivanja bazira na pogodnostima kao što su: jednostavna geometrija i male dimenzije kontaktnih elemenata, mogućnost kontrole i variranja relevantnih radnih uslova i strukturalnih parametara kontaktnog para, pouzdanog merenja određenog broja tribometrijskih karakteristika radnih uslova, kratko vreme dobijanja rezultata i smanjeni troškovi ispitivanja.

Tribološko ponašanje određenog materijala u uslovima trenja ne može se prihvati kao njegovo svojstvo, već se mora imati u vidu da je to karakteristika određenog tribomehaničkog sistema čija struktura transformiše ulazne parametre u tehnički korisni izlaz uz pojavu gubitaka energije i materijala usled triboloških kontaktnih površina. Iz ove činjenice proističe niz problema u pogledu ponovljivosti i primenljivosti rezultata ispitivanja. To je neophodno imati u vidu u procesu definisanja metodologije ispitivanja na tribometrima, izvođenja eksperimenta,

*Doc. dr Miroslav Babić, dipl. ing.*

*Mašinski fakultet, Kragujevac*

*Doc. dr Branislav Jeremić, dipl. ing.*

*Mašinski fakultet, Kragujevac*

prezentiranja dobijenih rezultata i njihovog korišćenja. Zbog toga se u radu sumiraju neka znanja koja mogu da predstavljaju određenu liniju vodilju u istraživanjima ovog tipa.

## 2. TRIBOMETRIJSKI RELEVANTNI PARAMETRI

Osnovni problemi ispitivanja na tribometrima i korišćenja dobijenih rezultata proističu iz činjenice da ni pokazatelji trenja, ni pokazatelji habanja ne predstavljaju svojstva određenog materijala, već su posledica složene površinske interakcije materijala pri relativnom kretanju u određenim kontaktnim uslovima.

Tribološke pojave na tribometru predstavljaju rezultat kompleksnog simultanog delovanja niza međusobno uslovljenih parametara koji reprezentuju sve elemente u kontaktu, uslove ostvarivanja kontakta i karakter međusobne interakcije. U formiraju njihove liste veoma je povoljno koristiti pristup kojim se tribološke interakcije odvijaju u sistemu (tribomehanički sistem) [1, 7, 8] definisanom:

- Parametrima radnih uslova (ulaz u sistem)
- Parametrima strukture
- Parametrima triboloških pojava (izlaz iz sistema).

U tabeli 1 data je specifikacija ovih parametara sa smerovima i stepenom međusobne uslovljenosti. Dat prikaz je uprošćenog karaktera jer njime nisu detaljno naznačeni svi parametri strukture i triboloških karakteristika.

Ta kompleksnost uticaja brojnih, međusobno zavisnih, faktora na karakter i intenzitet triboloških procesa iskaže se u oblasti tribometrije kroz veoma prisutne probleme vezane za:

- ponovljivost
- uporedivost
- primenjivost

rezultata do kojih se dolazi na tribometrima. Oni predstavljaju često nepremostivu prepreku na putu priku-

Tabela 1.

Broj	Faktori tribomehaničkog sistema	Stepen uticaja		
		Jak	Srednji	Slab
<b>RADNI USLOVI</b>				
1	Opterećenje	10, 11, 15	5, 8, 12, 13, 14	
2	Relativno kretanje	1, 10, 16	8	
3	Brzina relativnog kretanja	10, 11, 13, 14, 15	8, 11	
4	Trajanje procesa	7, 14, 15	8, 13	7
<b>STRUKTURA</b>				
5	Materijal elemenata	10, 11, 12, 13, 14, 15		
6	Makrogeometrija	10, 11	13, 14, 15	12
7	Mikrogeometrija	10, 11, 13, 14, 15	12	
8	Mazivo	10, 12, 15	13, 14	11
9	Okruženje	12, 15	13, 14	11
10	Uslovi podmazivanja	12, 13, 15	14	5
11	Naponsko stanje	13, 14, 15	5, 8	1, 7, 13
12	Stvaranje oksida	13, 14	11, 15	
<b>TRIBOLOŠKE KARAKTERISTIKE</b>				
13	Parametri trenja	11, 12, 14, 15	5, 7, 8	10
14	Parametri habanja	7	5, 11, 12	10, 13, 15
15	Temperatura površina	5, 8, 10, 11, 12	5, 11, 12	10, 13, 15

pljanja, sistematizovanja i korišćenja sve većeg broja dostupnih rezultata koji se realizuju korišćenjem nekoliko stotina eksperimentalnih procedura i uređaja [6]. Ovi problemi posebno su dobili na značaju sa prihvatanjem potrebe za formiranjem korisnički orientisanih informacionih sistema i u oblasti tribologije.

Njihovo rešavanje vezano je za poštovanje određenih metodoloških zahteva u pogledu definisanja i kontrole niza sistematizovanih parametara relevantnih za odvijanje procesa trenja i habanja u eksperimentima sa različitim svrhama i ciljevima.

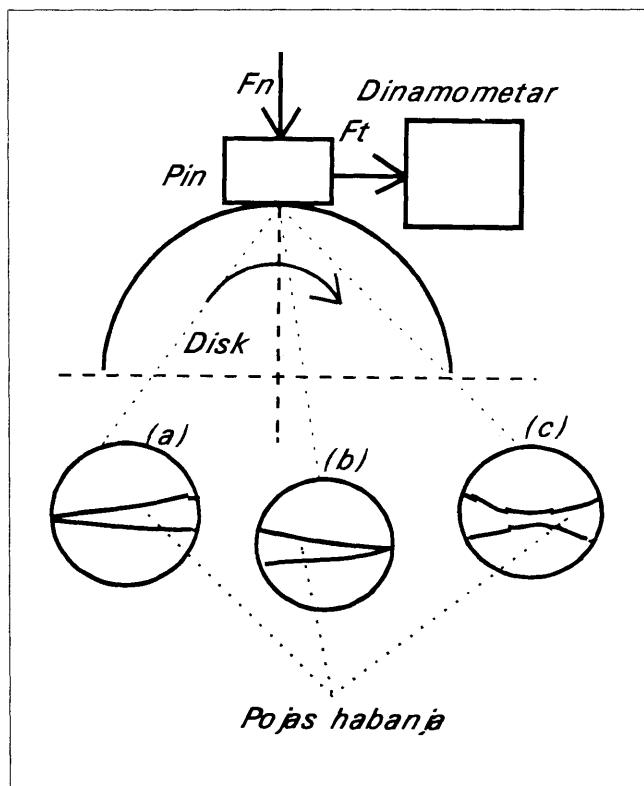
### 3. PONOVLJIVOST REZULTATA

Osnovni uzroci pojave rasipanja rezultata merenja na istom tribometru su:

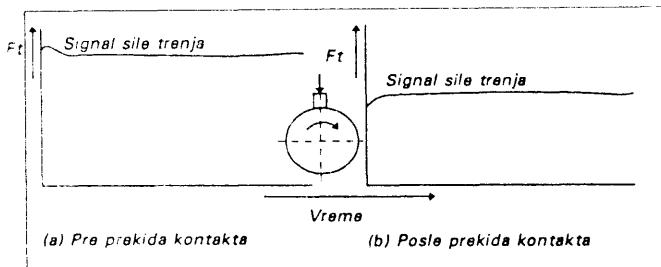
- nepouzdanost mernog sistema i
- nepouzdanost naleganja kontaktnih elemenata.

Nepouzданo naleganje kontaktnih elemenata uzrokuje nestabilnu geometriju kontakta i manifestuje se promenljivim parametrima radnih uslova, frikcionih parametara i parametara oblika i veličine habanja.

Na slici 1. pokazan je tipičan primer promenljivih oblika pojasa habanja uzrokovan nepouzdanim naleganjem kontaktnih elemenata u šemi nominalnog linijskog kontakta pri ponovljenim ispitivanjima triboloških karakteristika triboloških prevlaka. Nepouzданo naleganje



Sl. 1. Primeri različitih oblika habanja pri ponovljenim ispitivanjima  
The examples of wear scars variations  
Примеры вариаций формы изнашивания



Sl. 2. Uticaj prekida kontakta na veličinu sile trenja

The example of friction force as

the consequence of breaking contact

Пример воздействия разрыва контакта  
на изменение величины силы трения

kontaktnih elemenata uzrokuje posebne probleme pri ispitivanjima koja su praćena povremenim prekidima u cilju merenja parametara habanja. Svaki nastavak ispitivanja skopčan je sa rizikom uspostavljanja različitih kontaktnih uslova. Ova pojava ilustrovana je posledicama na veličinu sile trenja na slici 2.

Ove uzroke u valjano organizovanom eksperimentu eliminisu kalibraciona procedura mernog sistema i konstrukcijska rešenja koja obezbeđuju potreban broj sloboda pomeranja kontaktnih elemenata radi postizanja njihovog samonaleganja.

Mnogo "opasniji" po ponovljivost rezultata su uzroci koji su skriveni, jer proizilaze iz karaktera odvijanja procesa trenja i habanja i koji se pojavljuju u ispitivanjima koja zadovoljavaju navedene pretpostavke.

Tako na primer, sistematizovani prikaz medulaboratorijskih ispitivanja [5] sa tri standardne test metode (cilindar/cilindar, pin/disk i blok/prsten), čiji deo je prikazan u tabeli 2., pokazuje da se ponovljivost zapremine habanja izražena srednjim koeficijentom varijacije kreće od 15% za pin/disk metode do 57% za blok/prsten metodu.

Tabela 2.

Metod ispitivanja	Materijai elemenata	Uslovi ispitivanja	Srednji koefic. varijacije
Cilindar/cilindar (ASTM G-83)	čelik/čelik (M1/M2)	$F_n=71 \text{ [N]}$ $v=0.266 \text{ [m/s]}$ $l=3190 \text{ [m]}$	21 [%]
Blok/prsten (ASTM G-77)	čelik/čelik (01/4620)	$F_n=134 \text{ [N]}$ $v=0.13 \text{ [m/s]}$ $l=593 \text{ [m]}$	57 [%]
Pik/disk (ASTM G-2)	čelik/čelik (52100/52100)	$F_n=10 \text{ [N]}$ $v=0.1 \text{ [m/s]}$ $l=1000 \text{ [m]}$	15 [%]
Abrazija (ASTM G-65)	D-2 čelik	$F_n=130 \text{ [N]}$ $v=2.4 \text{ [m/s]}$ $l=4309 \text{ [m]}$	5 [%]
Erozija (ASTM G-76)	1020 čelik	abraziv: brzina - 70 [m/s] krupnoća=50 [ $\mu$ ] materijal $\text{Al}_2\text{O}_3$	4 [%]

Istovremeno ispitivanje abrazije i erozije standardnim metodama odlikuje veoma dobra ponovljivost rezultata. Ovako utvrđeni koeficijenti varijacija ne odnose se na medulaboratorijsku ponovljivost rezultata, već su pokazatelj mogućnosti reproducovanja rezultata u istoj laboratoriji pri nepromjenjenim uslovima. Pri tome svi uslovi ispitivanja i materijali elemenata bili su pažljivo definisani istovetno za sve laboratorije. Potrebno je, takođe, imati u vidu da se radi o ispitivanjima bez korišćenja maziva, u kojima je inače znatno redukovani broj uticajnih faktora na odvijanje procesa trenja i habanja.

Kao osnovni uzrok ove pojave prihvata se neuniformnost morfologije pohabanih površina. Ovu pojavu Blau i Whittenton [11] dovode u vezu sa stabilnošću mehanizma habanja. Naime, pojava promenljive morfologije pohabanih površina, po njima, svedoči o nepostojanju jednog, dominantnog, vira habanja za izabrane parametre radnih uslova (opterećenje, brzina, temperatura).

Dakle, kritični faktor ponovljivosti rezultata predstavlja izbor parametara koji obezbeđuju konstantnu morfologiju pohabanih površina (odnosno, postojanje stabilnog dominantnog vira habanja).

#### 4. UPOREDIVOST REZULTATA

Ozbiljan problem sa kojim se susreću korisnici dostupnih rezultata tribometrijskih istraživanja na brojnim tribometrima proističe iz nemogućnosti njihovog poređenja.

Osnovni uzrok nedovoljne uporedivosti rezultata vezan je za odsutstvo potpune liste relevantnih parametara uslova odvijanja eksperimenta.

Zbog toga se često u literaturi sugerise model liste koji bazira na sistemskom pristupu problemima trenja i habanja [1]. Ova obuhvata:

- Vremenske funkcije parametara radnih uslova
  - Opterećenje ( $F_n(t)$ )
  - Brzina relativnog kretanja ( $v(t)$ )
  - Temperatura ( $T(t)$ )
- Parametre strukture
  - Opis svih elemenata sistema
  - Zapreminska svojstva elemenata
    - geometrija
    - hemispsa svojstva
    - fizičko mehanička svojstva
- Svojstva kontaktnih slojeva
  - topografija površina
  - stanje materijala kontaktnih slojeva
- Nominalna površina kontakta
- Koeficijenti prekrivanja kontaktnih elemenata
- Vrsta podmazivanja
- Tribološke karakteristike
- Osnovne tribološke karakteristike
  - promena stanja kontaktnih elemenata

frikcioni parametri u funkciji vremena, ili puta trenja  
parametri habanja u funkciji vremena ili puta trenja

- Dopunske tribološke karakteristike
  - kontaktni električni otpor
  - parametri vibracija i buke
- Izgled pohabanih površina

Kompleksnost triboloških procesa, međutim, uslovjava da čak i ovako široko definisana lista parametara, koje je potrebno imati u vidu pri planiranju, izvođenju i saopštavanju rezultata eksperimenta, često ne obezbeđuje dovoljno pouzdanu podlogu za poređenje.

Među parametrima uslova ispitivanja koji se po pravilu zanemaruju, poseban značaj imaju dinamičke karakteristike tribometra uslovljene usvojenim konstrukcijskim rešenjima.

Dinamički model sistema u kome se odvija interakcija kontaktnih elemenata pri ispitivanju ilustrovana je primjerom "pin on disk" tribometra TR-3 (sl. 3.). Sistemi za obezbeđivanje relativnog kretanja, opterećenja i merenja tribometrijskih karakteristika predstavljaju lance elastičnih elemenata koji su u procesu ispitivanja izloženi prinudnim oscilatornim kretanjem. Osnovna dinamička poremećajna sila generiše se u sistemu usled određene neuravnoveženosti diska. Osim toga, uzroci oscilacija leže u diskretnim pojавama formiranja i izlaska iz kontakta čestica produkata habanja. Zbog toga kontaktno opterećenje, sila trenja i koeficijent trenja imaju dinamički karakter (sl. 4.), a osnovno relativno kretanje prate male oscilacije sa više stepena slobode, što uslovljava specifične uslove kontakta.

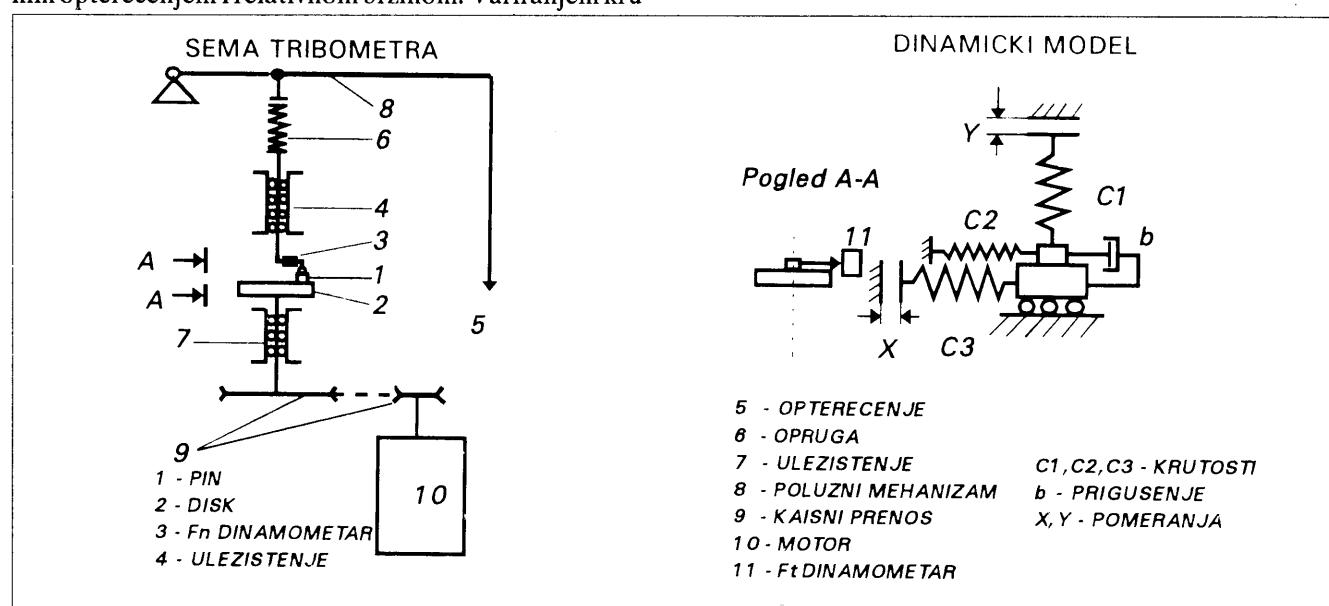
Karakter i stepen ovih pojava uslovljen je krutošću elastičnih elemenata, odnosno sistema u celini, kontaktnim opterećenjem i relativnom brzinom. Variranjem kru-

tosti elemenata u lancu za obezbeđivanje normalnog opterećenja realizuju se različiti dinamički uslovi, koji mogu poprimiti i veoma neželjene posledice na proces ispitivanja. Tako je na slici 5. prikazana pojava podrhtavanja kao vid prinudnih prigušenih oscilacija, karakteristična za malu razliku kružne frekvencije slobodnih i prinudnih oscilacija.

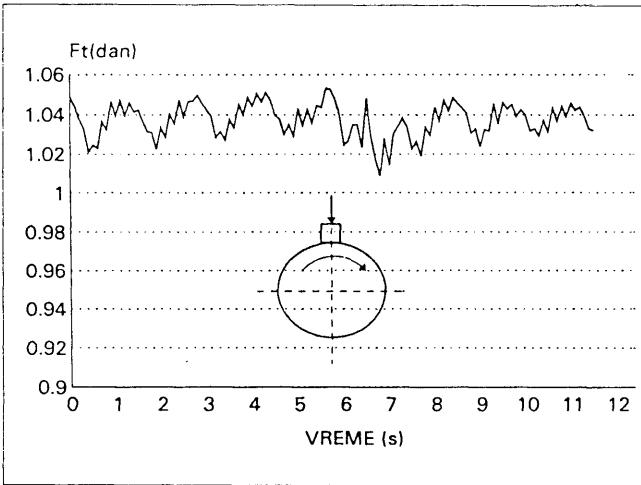
Niz istraživanja svedoči o mogućem značajnom uticaju kontaktnih oscilacija na trenje i habanje kontaktnih elemenata [12, 13, 14, 15]. U principu oscilacije doprinose smanjenju trenja, pri čemu je za uslove plastičnog kontakta neophodno realizovati znatno veće frekvencije nego u uslovima elastičnog kontakta. Uticaj vibracija na intenzitet habanja može biti dvojak zavisno od materijala elemenata u kontaktu [14, 15]. U sistemima kod kojih je taj uticaj pozitivan na smanjenje intenziteta habanja, stepen uticaja predstavlja funkciju trajanja kontakta tokom jednog ciklusa, a ono se smanjuje povećanjem amplituda oscilacija. Osim toga, pojava adsorbcije kiseonika na čistim kontaktnim površinama može imati značajno dejstvo na smanjenje intenziteta habanja. Pojava površinskog mehaničkog otvrđnjavanja nema značajnijeg uticaja [12].

Imajući ovo u vidu jasno je da promena krutosti sistema u kome se realizuje ispitivanje može rezultirati značajnim razlikama u tribološkim karakteristikama ispitivanih elemenata [13, 16]. Zbog toga je za validno poređenje tribometrijskih rezultata dobijenih na različitim tribometrima često neophodno listu relevantnih parametara uslova ispitivanja dopuniti dinamičkom krutošću sistema.

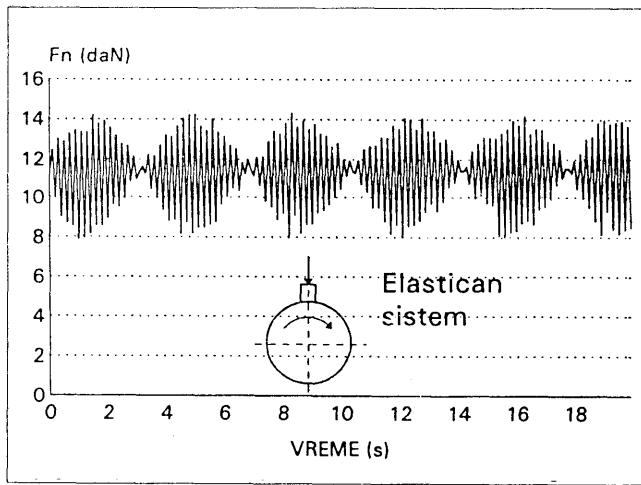
Generalno se može tvrditi da je povoljnije koristiti sisteme veće krutosti. Na taj način razlike u friкционim karakteristikama ispitivanih materijala jasnije se iskazuju, a osim toga rasipanja u rezultatima merenja trenja i habanja se redukuju.



Sl. 3. Dinamički model tribometra  
The dynamical model of tribometer  
Динамическая модель трибометра



Sl. 4. Dinamički karakter signala sile trenja  
The dynamical nature of friction force signal  
Динамический характер сигнала силы трения



Sl. 5. Pojava podržavanja u toku ispitivanja  
The appearance of beating  
Возникновение вибраций в ходе исследований

## 5. PRIMENLJIVOST REZULTATA

Ispitivanja koja su namenjena rešavanju triboloških problema određenih realnih tribomehaničkih sistema skopčani su sa problemom primenljivosti dobijenih rezultata. Zbog toga u ovakvim slučajevima izbor liste parametara strukture i radnih uslova podrazumeva rešavanje veoma složenog zadatka simuliranja triboloških interakcija realnog sistema na uprošćenom modelu tribometra.

U traženju puta za objektivno zasnovanim postupcima modeliranja posebno se velikim brojem radova ističe grupa sovjetskih autora, koja sačinjavaju V. S. Šcedorov, A. V. Čičinadze, G. I. Trajanovska, E. D. Braun, J. A. Jevdokimova i dr. Osnovu njihovog pristupa čini postupak iznalaženja tzv. "koeficijenta srazmere" između modela i originala na bazi teorije sličnosti i dimenzijske analize, što podrazumeva veoma složenu proceduru formiranja strukture modela, matematičke interpretacije uslova sličnosti, rešavanja sistema jednačina i eksperimentalnu proveru dobijenih rezultata.

Eksperimentalnoj prirodi tribometrije bliži su postupci koji baziraju na sledećem veoma uprošćenom algoritmu:

- Izbor identičnih materijala, maziva i uslova okruženja
- Izbor i podešavanje geometrijskih i kontaktnih uslova modela na osnovu niza relevantnih faktora
- Podešavanje parametara radnih uslova u cilju postizanja istih triboloških interakcija na modelu i realnom sistemu.

Nešto razudjenija struktura ovako definisanog algoritma data je na slici 6.

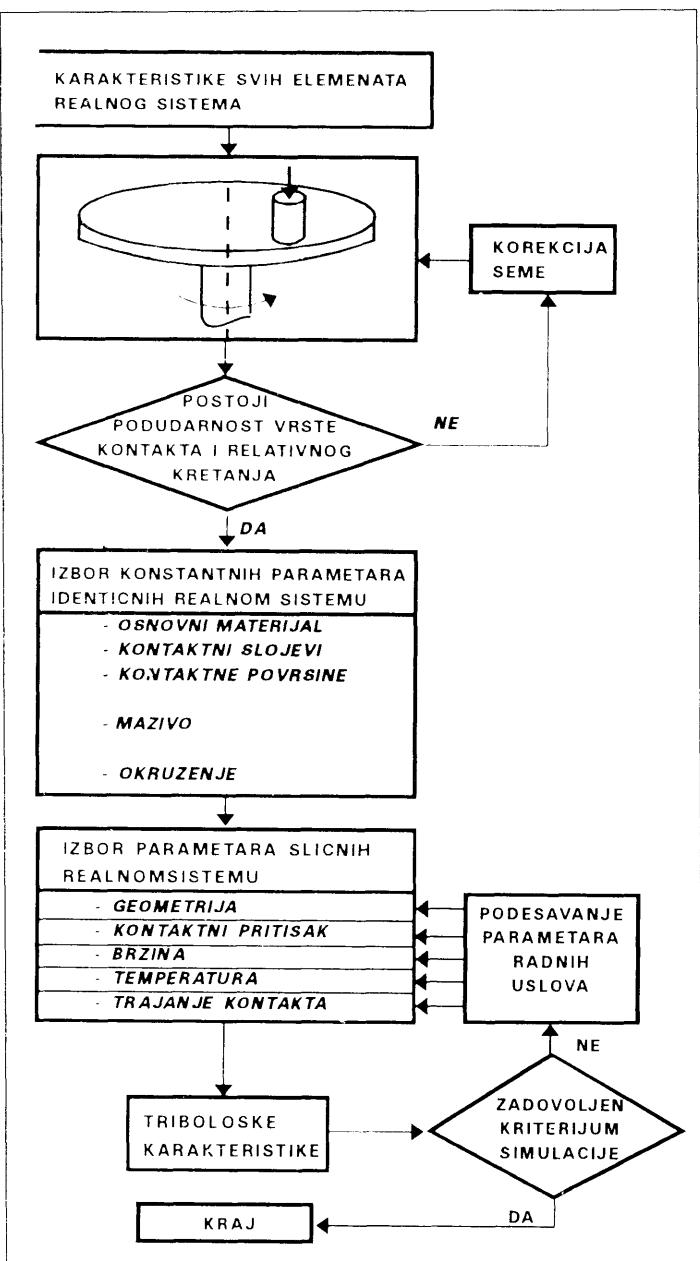
Početni korak u definisanju eksperimentalne procedure predstavlja izbor kontaktne šeme. Grubi izbor kontaktne šeme realizuje se na bazi zahteva za vrstom kontakta i relativnog kretanja. U daljem sužavanju izbora iz mnoštva postojećih šema za datu vrstu kontakta i relativnog kretanja preporučuje se pravilo po kome treba birati šeme koje se najčešće koriste u istraživačkoj praksi. Među

njima je i određeni broj standardizovanih. U narednoj fazi odluka o izboru donosi se na bazi geometrijske sličnosti kontakta realnog sistema i modela. Tu se pre svega misli na način ostvarivanja kontakta (nominalni dodir po liniji, u tački ili po površini). Naime, ista šema kontakta pojavljuje se u veoma velikom broju verzija s aspekta geometrije kontakta u užem smislu. Tako, na primer, u šemi "pin on disk" pin može biti kružnog ili paralelopipednog preseka, čelo može biti ravnog ili polusferičnog oblika, a takođe, u kontaktu može biti jedan ili više pinova.

Osim vrste kretanja neophodno je ispoštovati i vremenski karakter relativnog kretanja (kontinualno, prekidno, recipročno, oscilatorno).

U različitim uslovima ostvarivanja tribološke interakcije čvrstih tela ili čvrstih tela i fluida, u opštem slučaju, moguća je pojava brojnih vidova habanja za isti tip kontakta i relativnog kretanja koji se najčešće odvijaju simultano uz dominantno dejstvo nekog od njih. Zbog toga se fazom izbora kontaktne šeme stepen predodređenosti triboloških pojava svodi na globalne kategorije: klizanja, kotrljanja, udara, oscilacija, strujanja fluida po slobodnoj površini. Osim toga kontaktna šema opredeljuje odvijanje gasoabrazivnog habanja, erozije fluidom, habanja usled kavitacije, freting korozije. Međutim, sa određivanjem kontaktne šeme nemoguće je predodrediti realizovanje određenih oblika habanja karakterističnih za adheziono i zamorno habanje.

Nakon izbora kontaktne šeme potrebno je ostvariti tzv. konstantne parametre koji se odnose na strukturu (materijal elemenata, stanje kontaktnih slojeva i površina, mazivo i okruženje) na bazi uslova identičnosti sa realnim sistemom. Izbor ostalih relevantnih parametara (geometrija kontakta, kontaktno opterećenje, brzina relativnog kretanja, temperatura i trajanje procesa) koji predstavlja-



Sl. 6. Algoritam simulacije  
Flow chart of simulation  
Алгоритм симулацији

ju tzv. promenljive, odvija se u iterativnom postupku do zadovoljavanja usvojenog kriterijuma simulacije.

Kao kriterijum simulacije, zavisno od svrhe ispitivanja, može se koristiti jedan ili više pokazatelja triboloških interakcija. To mogu biti vrsta podmazivanja s obzirom na način razdvajanja kontaktnih površina (hidrodinamičko, mešovito, granično), parametri kontaktnih vibracija i parametri habanja. Najčešće se, međutim, sud o valjanosti izabranih parametara modela u odnosu na realni sistem donosi na bazi sličnosti relevantnih parametara razvoja procesa habanja. Korišćenje ovakog kriterijuma simulacije podrazumeva korektnu identifikaciju vrste habanja na realnom sistemu a potom i na modelu.

Kod sistema u kojima se kontakt ostvaruje između čvrstih tela i fluida sa abrazivnim česticama ili bez njih problem identifikacije vrste habanja je jednostavniji jer postoji direktna korelacija između vrste fluida i sadržaja čvrste faze sa dominantnom vrstom habanja. Na primer, u interakciji čvrstog tela i tečnosti kao nosioca čvrste faze stvaraju se uslovi za hidroabrazivno habanje. Međutim, kod triboloških sistema sa kontaktom čvrstih tela zbog simultanog odvijanja habanja različite vrste često je veoma teško izlučiti ono koje ima dominantni karakter.

Međutim, očekivani vid habanja ne može se koristiti kao kriterijum simulacije. Objektivna simulacija podrazumeva njegovu identifikaciju na realnom sistemu i modelu. U identifikovanju dominantnog mehanizma habanja, ili vrste habanja, po pravilu se koriste određene pojave koje prate proces habanja i manifestacije procesa habanja na kontaktnim površinama, odnosno, oblici habanja kontaktnih površina, čiji su najkarakterističniji oblici prikazani u tabeli 3. Realizovanje oblika habanja kontaktnih površina na modelu koji odgovara realnom sistemu svedoči o pojavi iste vrste habanja, što se najčešće prihvata kao dokaz uspešne simulacije.

Tabela 3. Tipični oblici habanja površina

Oblici habanja	Mehanizmi habanja
Grebanja (scratching) Mikrorezanja (microcutting) Brazdanje (plowing) Utiskivanje (indenting) Istiskivanje (extrusion)	Abrazija
Zaribavanje (seizure) Brazdanje u pravcu relativnog kretanja (scoring) Lokalno hladno zavarivanje (scuffing)	Adhezija
Ljuskanje (spalling) Krateri Pukotine (cracks) Stvaranje jamica (pitting)	Zamor
Proizvodi hemijske reakcije	Tribohemijija

## 6. ZAKLJUČAK

- ▶ Ispitivanja trenja i habanja imaju specifičan karakter koji je uslovljen spregnutim delovanjem niza parametara uslova ispitivanja na odvijanje triboloških interakcija, što se manifestuje kroz probleme ponovljivosti, uporedivosti i primenljivosti dobijenih rezultata.
- ▶ Zadovoljavajuća ponovljivost rezultata uslovljena je pre svega pouzdanuću mernog sistema i naleganja kontaktnih elemenata. Međutim, istraživanja pokazuju da postoje mnogo skriveniji uzroci male ponovljivosti, koji su uzrokovani nestabilnošću mehanizma habanja. U tim slučajevima kritični faktor ponovljivosti rezulta-

- ta predstavlja izbor parametara koji obezbeđuju konstantnu morfologiju pohabanih površina (odnosno, postojanje stabilnog dominantnog vida habanja).
- Mogućnost poređenja rezultata ispitivanja na brojnim tribometrima uslovljena je raspoloživim parametrima koji karakterišu uslove ispitivanja. Kao dobar model u formiranju liste ovih parametara može poslužiti tzv. sistemski pristup, koji podrazumeva definisanje radnih uslova, strukture i tribometrijskih karakteristika. Ovom listom nisu obuhvaćeni svi parametri koji mogu biti za poređenje. To se pre svega odnosi na dinamičke karakteristike sistema, koje mogu imati bitan uticaj na trenje i habanje ispitivanog kontaktnog para.
  - Pri izboru relevantnih parametara ispitivanja koja pretenduju na primenljivost na određeni realni sistem potrebno je ispoštovati iterativni postupak uspostavljanja sličnosti radnih uslova, struktura i triboloških karakteristika do zadovoljavanja usvojenog kriterijuma simulacije.

## LITERATURA

- [ 1] CZICHOS H., **Tribology, a system approach to the science and technology of friction, lubrication and wear**, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam 1978.
- [ 2] BUDINSKI K., **Wear testing**, Proceedings of the tutorial session "Wear fundamentals for engineering", International conference on wear of materials, Denver, Colorado, April 1989.
- [ 3] HABIG K. H., **Principles of wear testing**, Proceedings of the JTC, Nagoya 1990.
- [ 4] M. BABIĆ, **An aproach to the measurement of tribological characteristics of contact layers of triboelements**, Proceedings of the EUROTRIB 89, Helsinki
- [ 5] RUFF A. V., **Comparasion of standard test methods for non-lubricated sliding wear**, Wear 134, No 1, 1989.
- [ 6] Grupa autora, **Friction and wear devices**, second edition, ASLE, 1976.
- [ 7] MOLGAARD J., CZICHOS H., **The application of systems techniques to the study of wear**, WEAR OF MATERIALS 1977 (New York ASME, 1977.)
- [ 8] CZICHOS H., **Tribometry-classified methods of testing for friction and wear**, Probljemy mašinostrenija i avtomatizacij, No 11, 1986.
- [ 9] M. BABIĆ, **Savremeni tribometrijski sistem**, Zbornik radova konferencije YUTRIB 89, Kragujevac
- [10] M. BABIĆ, **Tribological Effects of hard lubricant coating application**, Proceed. of the JTC, Nagoya 1990.
- [11] P. J. BLAU, E. P. WHITENTON, **The effect of flat-on-ring sample alignment on sliding friction break in curves for aluminium bronze on 52100 steel**, Wear, 94, 1984.
- [12] H. GOTO, M. ASHIDA, **Effects of ultrasonic vibration on the wear characteristics of a carbon steel**, Analysis of the wear mechanism, Wear 94, 1984.
- [13] K. KATO, A. IWABUCHI, T. KAYABA, **The effects of friction-induced vibration on friction and wear**, Wear 80, 1982.
- [14] M. ABO, T. SAKAMOTO, S. KAKUNAI, **The effect of oscilatory load on sliding friction**, Proceedings of the JTC, Nagoya, 1990.
- [15] B. JEREMIĆ, **Contact at external dinamic load of a tribomechanical system**, Proceedings of the JTC, Nagoya, 1990.
- [16] Y. C. CHIOU, K. KATO, **Effect normal stiffness in loading system on wear of carbon steel (part 1 and 2)**, Journal of tribology, Vol. 107 and 108, 1986.

## Specificities of Wear And Friction Investigations On Tribometers

*Wear and friction investigations have a very specific character, which is caused by coupled influence of a series of parameters of tests conditions on realization of tribological interactions, what manifests itself through problems of repeatability, comparability, and applicability of obtained results.*

*Satisfying repeatability of results is caused, before all, by reliability of the measuring system and overlaying of contact elements. However, tests have shown that there are more covert causes of low repeatability, that are caused by instability of the wear mechanism. In those cases the critical factor of repeatability of results represents a choice of parameters that provide constant morphology of the worn surfaces (namely, existence of stable dominant type of wear).*

*Possibility of comparison of tests results on numerous tribometers is caused by available parameters that characterize the tests conditions. As a good model in forming a list of these parameters we can use the so called systematic approach, which assumes definition of working conditions, structure and tribometric characteristics. This list does not include all the parameters that can be compared. That, before all, applies for dynamic characteristics of the system that can have significant influence on friction and wear of the tested contact pair.*

*In choosing the relevant test parameters that are aimed for application to certain real system it is necessary to respect the iterative procedure of establishing the similarity of the working conditions, structure and tribological characteristics up to satisfying the adopted simulation criterion.*

## **Специфика исследований трения и изнашивания на трибометрах**

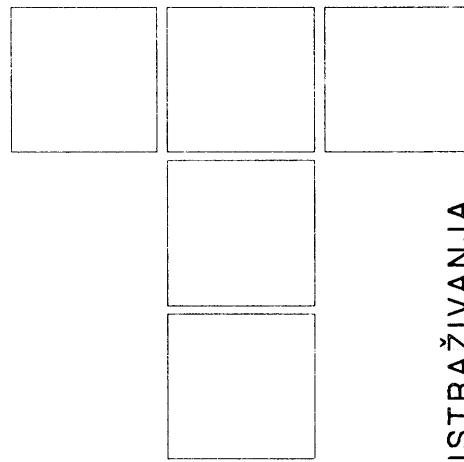
*Исследование трения и изнашивания имеет специфический характер, обусловленный сочетательным воздействием ряда параметров условий проведения исследований на процессы трибологического взаимодействия, что проявляется в проблемах повторяемости, сравниваемости и применяемости полученных результатов.*

*Удовлетворительная повторяемость результатов определяется, прежде всего, надежностью измерительной системы и прилеганием контактирующих элементов. Но исследования указывают на более скрытие причины, небольшой повторяемости, обусловленные неустойчивостью механизма изнашивания. В этих случаях критическим фактором повторяемости результатов является выбор параметров, обеспечивающих постоянную морфологию изношенных поверхностей, т.е. существование постоянного доминирующего вида изнашивания.*

*Возможность сравнения результатов исследования на многих трибометрах определяется существующими параметрами, характеризующими условия исследований. Хорошей моделью формирования этих параметров может послужить так называемый систематический подход, подразумевающий определение условий работы, структуры и трибометрических характеристик. В настоящей работе не приведены все параметры, которые можно сравнивать. Это, в первую очередь, динамические характеристики системы, которые могут существенно воздействовать на трение и изнашивание исследуемой трущейся пары.*

*При анализе существенных параметров исследований, применимых на реальную систему, необходимо максимальное приближение симулируемых условий работы, структуры и трибологических характеристик к действительным условиям.*

*Društvo tribologa Jugoslavije  
nastavlja aktivnosti  
Jugoslovenskog komiteta  
za tribologiju*



# Mogućnost modeliranja topografije površina u kontaktu

## 1. UVOD

Brojna teorijska i eksperimentalna ispitivanja vršena na površinama elemenata u kontaktu kod mašinskih elemenata: zupčanika, kliznih ležišta, vodica alatnih mašina i drugih, pokazala su da je korelacija između intenziteta habanja i topografije površina bitan faktor uspostavljanja tribološke ravnoteže, te je iz tih razloga neophodno, korišteći savremene metode merne i računarske tehnike, što tačnije definisati promenu topografije aktivne površine.

Cilj ovog rada je da se analizom uticaja parametara završne obrade izraženih kroz mikrogeometriju površine i mogućnost njihovog matematičkog modeliranja dode do programa za numeričko rešavanje problema. Ovim putem bio bi rešen jedan od bitnih faktora značajnih za nosivost kontaktnih površina, koji pored materijala, njegovih fizičko hemijskih svojstava, strukture površinskog sloja nastale pri procesima završne termičke obrade i zaostalih napona u zoni kontakta, predstavlja suštinski parametar tehnološkog nasledja površine u kontaktu.

## 2. TEORIJSKA RAZMATRANJA

Kontaktne površine delova mašina u procesu rada teže ka uspostavljanju tribološke ravnoteže koju definiše konstantna vrednost intenziteta habanja. Kako je u zoni kontakta prisutan proces uparivanja kontaktnih površina jednog tribološkog para, sistem ulaznih veličina pri analizi slučajnog procesa čine statističke veličine topografije površine i kinematski i dinamički parametri zone kontakta, a za izlaznu veličinu imaju makro i mikro reljef kontaktnih površina.

U tom procesu sa aspekta konstrukcije primarno učestvuje materijal elemenata u kontaktu sa svojim karakteristikama i mikrostrukturu površinskog sloja, a zatim složenih

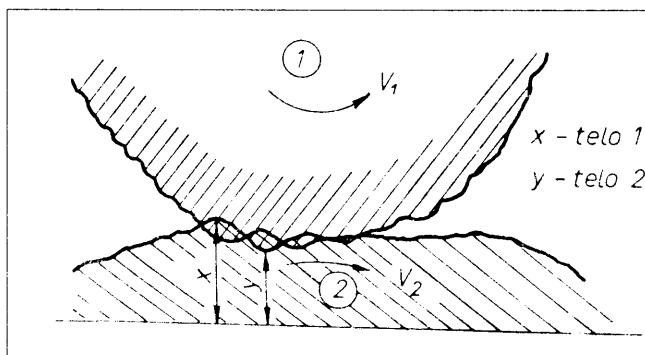
---

Prof. dr Danica Josifović, dipl. ing.  
Mašinski fakultet, Kragujevac  
Nataša Jović, dipl. ing.  
Mašinski fakultet, Kragujevac

oblika površina elemenata. U procesu uparivanja površina izlazne veličine koje se odnose na topografiju površina su promene geometrijskog oblika u makro i mikro varijanti, odnosno promena hrapavosti površine. Eksperimentalana ispitivanja u ovoj fazi baziraju na snimanju profila površina u kontaktu i definisanju parametara hrapavosti.

## 3. MODEL MIKROKONTAKTA

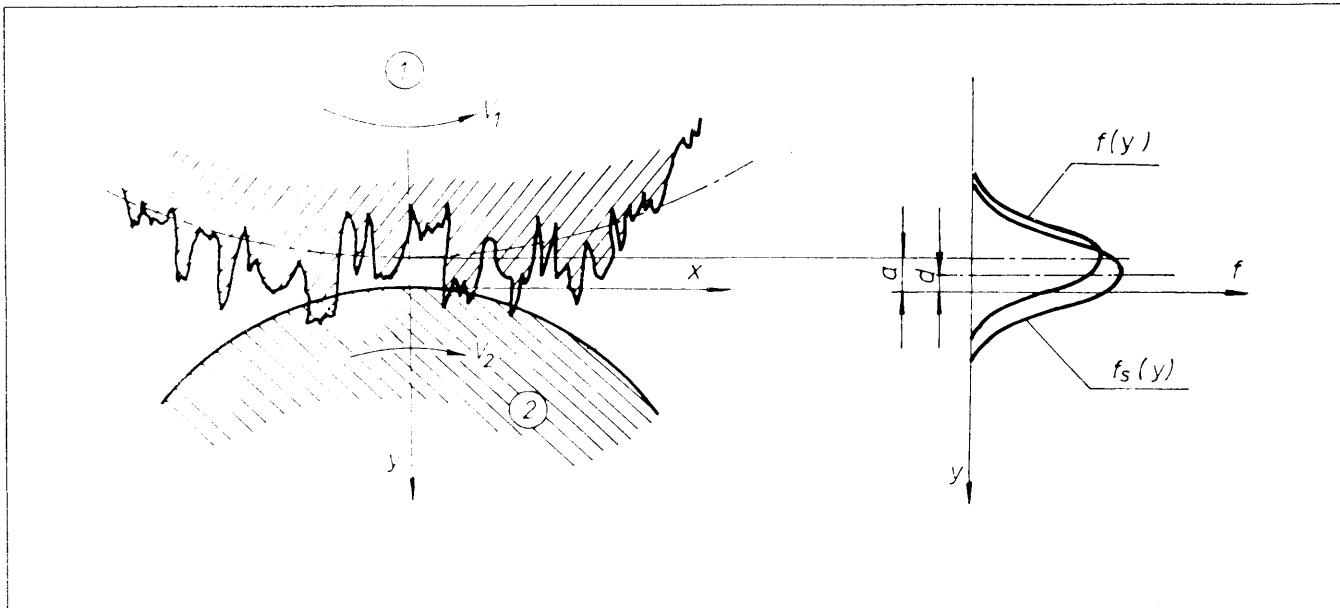
Na sl. 1 dat je primer jednog tribološkog para pri formiranju topografije površine u fazi uparivanja kontaktnih površina.



Sl. 1 Formiranje topografije površine u kontaktu  
Forming of the topography of surfaces in contact  
Формирование топографии  
поверхностей в контакте

Prikazani model kontakta je vrlo složen, pa se najpre razmatra jednostavniji model dve hrapave površine elemenata u kontaktu, pri čemu se svi elementi hrapavosti površine nalaze na jednom delu, a drugi se posmatra kao idealno gladak. Šema jednog takvog modela data je na sl. 2.

Analizom mikrokontakta jednodimenzionalnog modela prikazanog na sl. 2 definisane su sledeće statističke veličine:  $f(y)$  - funkcija gustine ordinate profila hrapave površine,  $f_s(y)$  - funkcija gustine vrhova profila hrapave površine,  $a$  - udaljenje srednje linije ekvivalentne hrapave površine od glatke ravni i može se izračunati preko izraza:



Sl. 2 Model kontakta dva mašinska dela  
Model of two elements of machines in contact  
Модель контакта двух деталей машин

$$a = h_o + 0.5\sigma_e \dots \dots \dots (1)$$

gde je:  $\sigma_e$  - ekvivalentno standardno odstupanje i jednako:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2} \dots \dots \dots (2)$$

a  $\sigma_{s1}$  i  $\sigma_{s2}$  su standardna odstupanja ordinata vrhova hrapave površine za telo 1 i 2 i  $h_o$  - rastojanje između srednjih linija modeliranih površina jednakog kod mešovitog trenja u kontaktu debljini sloja maziva, pa se prema formuli DOWSONA i TOXODA [1] može izračunati:

$$h_o = 3.12\alpha^{0.56} \cdot \eta_o^{0.69} \cdot v^{0.69} \cdot E^{-0.03} \cdot R^{0.41} \cdot w^{-0.1} \dots (3)$$

gde su:  $\alpha$  - pritisni koeficijent viskoznosti,  
 $\eta_o$  - viskozitet primjenjenog sredstva za podmazivanje,  
 $v$  - srednja hidrodinamička brzina,  
 $E'$  - redukovani modul elastičnosti,  
 $R$  - redukovani radijus krivine i  
 $w$  - linijsko opterećenje kontakta.

Navedene veličine se određuju preko izraza:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2} \dots \dots \dots (4)$$

$$E' = \frac{1}{\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}} \dots \dots \dots (5)$$

gde su  $\nu_1$  i  $\nu_2$  Poasonovi brojevi za materijal tela 1 i 2.

$$R = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \dots \dots \dots (6)$$

Gustina raspodele ordinata profila hrapave površi  $f_p(y)$  data je preko zakona normalne raspodele izrazom:

$$f_p(y) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_e} \cdot e^{-\frac{(y-s)^2}{2 \cdot \sigma_e^2}} \dots \dots \dots (7)$$

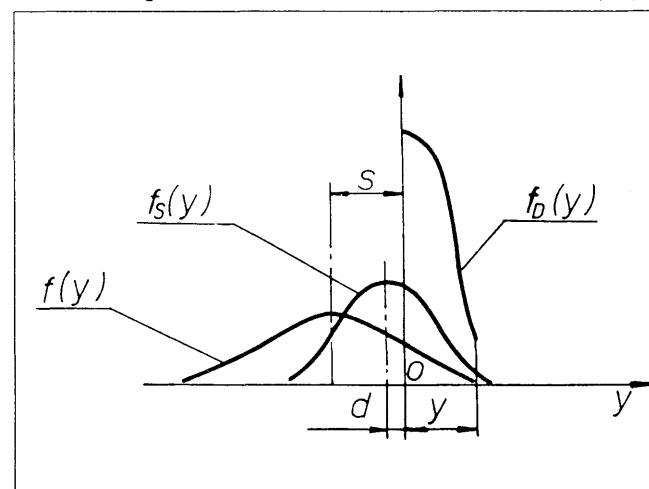
a za  $f_s(y)$  prema izrazu:

$$f_s(y) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_s} \cdot e^{-\frac{(y-d)^2}{2 \cdot \sigma_s^2}} \dots \dots \dots (8)$$

pri čemu se na osnovu izvedenih istraživanja autora WHITEHOUSE i ARCHARD [2] može uzeti da je:

$$\sigma_s \approx 0.7\sigma_e \dots \dots \dots (9)$$

$$d \approx a - 0.8\sigma_e \dots \dots \dots (10)$$



Sl. 3 Funkcija raspodele gustina  $f(y)$ ,  $f_s(y)$  i  $f_D(y)$   
Funktion of distribution of the density  $f(y)$ ,  $f_s(y)$  and  $f_D(y)$   
Функция распределения плотности  $\phi(y)$ ,  $\phi_s(y)$  и  $\phi_D(y)$

Na sl. 3 data je raspodela gustina  $f(y)$  i  $f_s(y)$  kao i deformacija vrha hrapavosti  $f_D(y)$  kod razmatranog jednodimenzionalnog modela mikrokontakta.

Izrazi (7) i (8) važe samo za površine koje nemaju unapred determinisanu osnovnu strukturu površinske hrapavosti. U slučaju da je prethodno poznata hrapavost površine, prelazi se sa funkcije normalne raspodele na Rayleigh-enu raspodelu, a funkcija normalne raspodele se može primeniti kao približna.

Kod jednodimenzionalnog modela kontakta hrapave površine prema GREENWOOD-u i WILLIAMSON-u [3] javljaju se tri karakteristične veličine: standardno odstupanje vrha brega  $\sigma_z$ , radijus krivine  $r$  sfernog oblika vrha hrapave površine i  $N$  broj vrhova neravnina na nominalnoj površini. Za ove veličine važi približan odnos:

$$\sigma_z N \approx 0.5 \quad \dots \dots \dots \quad (11)$$

Na osnovu istraživanja autora [3] kontakt hrapave i idealno glatke površine se formira ako je vrh breg  $y$  veći od širine  $d$  i tada specifičan broj  $n$  mikrokontakta iznosi:

$$n = \frac{N}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot \sigma_z} \cdot \int_d^{\infty} e^{-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} dy \quad \dots \dots \dots \quad (12)$$

a realna površina kontakta tada iznosi:

$$A_r = N \cdot \frac{r}{\sigma_z} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \int_d^{\infty} (y-d) \cdot e^{-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} dy \quad \dots \dots \quad (13)$$

Nominalni pritisak na hrapavoj površini predstavlja odnos iz ukupnog opterećenja vrha hrapave površine i nominalne površine kontakta i dat je izrazom:

$$p_a = \frac{4 \cdot E'}{3 \cdot \sigma_z} \cdot \sqrt{\frac{r}{2 \cdot \pi}} \cdot N \cdot \int_d^{\infty} (y-d)^{3/2} \cdot e^{-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} dy \quad \dots \dots \quad (14)$$

Navedene zavisnosti omogućavaju određivanje kontaktnih uslova za sve uzajamno zavisne hrapave površine. Pri tome je moguće kroz relevantan opis površinske hrapavosti posmatrati u dvodimenzionalnom prikazu deformacije i trajanje kontakta na jedan relativno jednostavan način matematičkog prikazivanja deformacija [4, 5]).

Za analizu jednog pojedinačnog mikrokontakta posmatra se deformacija jednog vrha hrapave površi. Ako su vrhovi pri tome normalno raspodeljeni, onda deformacije imaju skraćenu raspodelu. Za analizu kontakta hrapavih površina uzeta je normalna raspodela u intervalu  $[0; y_z]$ . Gustina verovatnoće deformacije jednog vrha hrapave površine ima sledeći oblik:

$$f_D(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_z \cdot \left[ \Phi\left(\frac{y_z+d}{\sigma_z}\right) - \Phi\left(\frac{d}{\sigma_z}\right) \right]} \cdot e^{-\frac{(y-d)^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} \cdot dy \quad \dots \dots \dots \quad (15)$$

za:  $0 \leq y \leq y_z$  a za  $y > y_z$  biće:

$$\Phi(\tau) = (2 \cdot \pi)^{-\frac{1}{2}} \cdot \int_{-\infty}^{\tau} e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

i funkcija raspodele prikazuje normalnu raspodelu.

U slučaju da se jedna od površina ne kreće, u jednačini (15) treba staviti da  $(y_z \rightarrow \infty)$ .

## 4. NUMERIČKO IZRAČUNAVANJE KARAKTERISTIČNIH VELIČINA MIKROKONTAKTA

Kao ilustracija navedenih razmatranja i korišćenih izraza u modeliranju uraden je program za numeričko izračunavanje karakterističnih veličina mikrokontakta, pri čemu su uzeti zapisi profila sa obe hrapave površine u kontaktu.

Ispitivan je tribološki par klizno ležište - rukavac vratila, odnosno posteljica kliznog ležišta izrađena od bronce i rukavac vratila od čelika sledećih karakteristika:

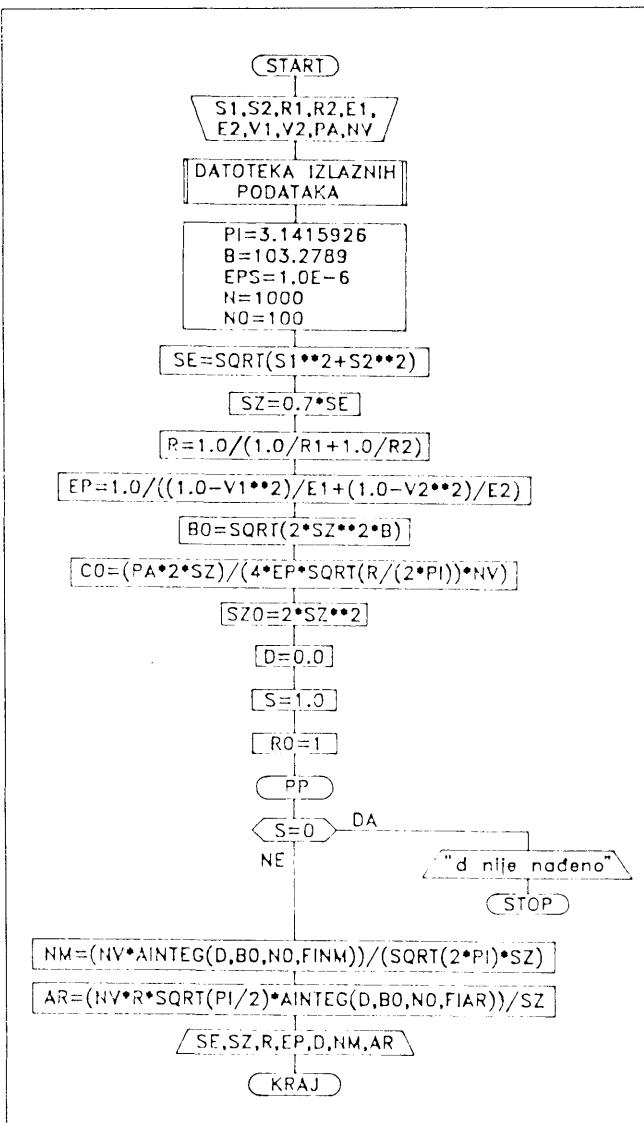
- moduli elastičnosti za čelik:  $E_1 = 2.1 \cdot 10^5 \text{ MPa}$  i za bronzu:  $E_2 = 1.15 \cdot 10^5 \text{ MPa}$ ;
- Poasonovi brojevi za tela u kontaktu 1 i 2 iznose  $\nu_1 = 0.3$ ,  $\nu_2 = 0.3$ ;
- standardno odstupanje ordinata profila, zapis dobijen na mernom uređaju TALYSURF 6  $\sigma_1 = 0.20 \mu\text{m}$ ,  $\sigma_2 = 1.41 \mu\text{m}$ ;
- radijus krivina vrhova neravnina tela u kontaktu određen kao srednja vrednost radijusa krivina deset vrhova na referentnoj dužini  $R_1 = 1.1 \mu\text{m}$  i  $R_2 = 0.8 \mu\text{m}$ ;
- broj vrhova neravnina na normalnoj površini prema preporukama  $N=3000$ .

Na sl.4 je dat algoritam za numeričko izračunavanje triboloških parametara  $A_r$ ,  $n$ ,  $a$  i  $h_o$  za slučaj mešovitog podmazivanja rukavca u kliznom ležištu, a na sl. 5 dat je podprogram na osnovu koga se izračunava nesvojstveni integral  $I$ .

Na osnovu preporuka da  $p_a$  u kontaktu ne bude veće od  $p_a = 0.1 \text{ MPa}$  i da za tu vrednost pritiska nesvojstveni integral  $I$  koji se javlja pri izračunavanju pritiska  $p_a$ :

$$I = \int_d^{\infty} (y-d)^{\frac{3}{2}} \cdot e^{-\frac{y^2}{2 \cdot \sigma_z^2}} dy \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

vrlo brzo konvergira nuli već za  $y \approx 5$ , usvojeno je da je  $d \approx 2.2 \mu\text{m}$  i izračunata vrednost integrala  $I = 0.01$ . Sa ovim



SL.4 Algoritam za numeričko izračunavanje karakteristika mikrokontakta

Algorithm for numerical calculation of the characteristics of the microcontact

Алгоритм для численного подсчета характеристики микроконтакта

vrednostima na osnovu programa izračunava se : realna površina kontakta  $A_r$ , broj mikrokontakta na realnoj površini  $n$ , odstupanje srednje linije ekvivalentne hrapave površine od glatke ravni i debljina sloja maziva za slučaj mešovitog podmazivanja  $h_o$ , pri čemu su veličine  $A_r$ , određene prema izrazu (13),  $n$  prema izrazu (12), a  $h_o$  prema izrazu (1) i iznose :

$$n = 40.98302, A_r = 0.2085286 \cdot 10^2 \mu\text{m}^2, a = 3.339291 \mu\text{m}$$

$$i h_o = 2.6272340 \mu\text{m}.$$

Numeričko izračunavanje navedenih veličina izvršeno je pri ekvivalentnom standardnom odstupanju ordinata profila  $\sigma_e = 1.4241 \mu\text{m}$ , standardnom odstupanju vrha brega  $\sigma_z = 0.9969 \mu\text{m}$ , redukovanim radijusu krvine  $R = 0.4632 \mu\text{m}$ , redukovanim modulu elastičnosti  $E' = 81656.8 \text{ MPa}$ .

```

$   FUNCTION AINTEG (A, B, N, FUN)
C   METOD PARABOLE
C   N2= 2*N - BROJ SEGMENTATA
REAL A, B
REAL AINTEG, FUN, S, SO, D, T
INTEGER N, I
C   N2= N+N
S= FUN(A) + FUN(B)
D= (B-A) / N
T= A + D/2
SO= 0.0
DO 10 I= 1, N
    SO= SO + FUN(T)
    T= T + D
10  CONTINUE
S= S + 4*SO
T= A + D
SO= 0.0
DO 20 I= 1, N-1
    SO= SO + FUN(T)
    T= T + D
20  CONTINUE
AINTEG= (B-A) / (6*N) * (S + 2*SO)
RETURN
END
$
```

### Sl.5 Podprogram za izračunavanje

nesvojstvenog integrala I

Subroutine for calculation of the improper integral I

Подпрограмма для подсчета  
несвойственного интеграла И

Na osnovu izračunate vrednosti  $h_o$  i datog izraza (3) u kome je prikazana zavisnost bitnih parametara maziva, geometrijskih veličina mikrokontakta i linijskog opterećenja kontakta, za usvojeno mazivo i njegove poznate karakteristike može se izračunati veličina  $w$  linijskog opterećenja kontakta. U proračunima je tada moguće na osnovu ovih relacija definisati dozvoljeno opterećenje kontakta određenog tribološkog para.

Osim toga, mogu se izračunati i druge veličine značajne za razmatranje ovog problema i pri tome odrediti njihove dozvoljene vrednosti zavisne od mikrogeometrije kontakta i ostalih kinematskih i dinamičkih karakteristika.

## 5. ZAKLJUČAK

Na osnovu teorijskih razmatranja i izrade matematičkog modela za problem jednodimenzionalnog mikrokontakta, kao i numeričkog izračunavanja bitnih karakteristika jednog određenog tribološkog para, kliznog ležišta i rukavca vratila, može se zaključiti da se matematičkim modeliranjem osnovnih zavisnosti mikrogeometrije kontakta razmatranog tribološkog para pruža mogućnost za numeričko izračunavanje složenih matematičkih izraza, a time određivanje ne samo osnovnih parametara mikrokontakta kao što su:  $n$ ,  $A_r$  a i  $h_o$ . već preko njih i

definisanje dozvoljenih opterećenja kontakta datog triboškog para za usvojeno mazivo i ostvarenu vrstu podmazivanja površina u kontaktu.

Navedeni izrazi pri matematičkom modeliranju se mogu generisati i u sledećem koraku razmatrati problem dvo-dimenzionalnog mikrokontakta, pri čemu bi se obuhvatila funkcija raspodele za mikrogeometriju kontakta kod oba tela sa svim karakteristikama hraptave površine, a posebno bi bilo analizirano i vreme trajanja mikrokontakta kao vrlo značajan parametar u ovim istraživanjima.

## LITERATURA

[1] DOWSON,D.;TOYODA,S.: A central film thickness formula for elastohydrodynamic line contacts, Proc. 5th Leeds - Lyon Symp. on Tribology Elastohydrodynamics and Related Topics, Leeds (1978), p. 60 - 64.

[2] WHITEHOUSE, D.; ARCHARD,J.F.: Properties of random surfaces of significance to their contact, Proc. Royal Society of London, Ser. A, Vol. 316, (1970), p. 97-121

[3] GREENWOOD, J. A.; WILLIAMSON, J.B. P.: Contact of nominally flat surfaces, Proc. Royal Society of London, Ser. A, Vol.295 (1965), p.300-391

[4] BECKMANN, G.; KLEIS,I.: Abtragverschleiss von Metallen, Verlag für Grundstättindustrie, Leipzig (1983).

[5] DIERICH, P.: Modellierung des Einflusses der Rauheit auf die Verschleissprognose, Dissertation B an der Ingenieurhochschule Zittau, (1987).

[6] WIESNIEWSKI, M.; DIERICH, P.: Modellierung rauer Oberflächen im EHD-Kontakt, Schmierungstechnick, Berlin 21(1990), H. 9, s. 262-265.

## Possibility for modeling of the topography by contact surfaces

*In this paper are presented some of possibilities for modeling of the topography of surfaces in contact. In consideration of this problem analysed was the effect of some tribological parameters by the solid bodies in contact and determined were conditions to form the adequate approximation of mathematical relation, which includes microgeometry of the surface, EHD-sizez and the other mechanical characteristics.*

*Later is given as an example the onedimensional model of the microcontact. Through the definition of the mathematical model of microgeometry of the contact surfaces is enabled the realization of the program for computer processing and numerical calculation of the number of the microcontacts and of the real contact surfaces as a function of the nominal pressure, as well as the other parameters that are important for research in this area.*

## Возможность моделирования топографии контактирующих поверхностей

*В работе изложены некоторые из возможностей моделирования топографии поверхностей в контакте. При изучении проблемы анализируется воздействие отдельных трибологических параметров при контакте твердых тел и определяются условия формирования соответствующей приближенной математической зависимости охватывающей микротопографии поверхности, упругоидродинамические величины и другие механические характеристики. Кроме того, приведен пример одновременной модели микроконтакта. Определение математической модели микротопографии контактирующих поверхностей дает возможность для создания программы электропроцессинговой обработки и числового подсчета количества микроконтактов и реальных контактных поверхностей в функции номинального давления, как и других величин значительных в этой области исследования.*